



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Patentschrift  
⑩ DE 33 09 239 C 2

⑤1 Int. Cl.<sup>5</sup>:  
B 06 B 1/06

②1 Aktenzeichen: P 33 09 239.7-53  
②2 Anmeldetag: 15. 3. 83  
④3 Offenlegungstag: 20. 9. 84  
④6 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 12. 9. 91

DE 33 09 239 C 2

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑦3 Patentinhaber:  
Siemens AG, 1000 Berlin und 8000 München, DE

⑦2 Erfinder:  
Kleinschmidt, Peter, Dipl.-Phys., 8000 München, DE;  
Meixner, Hans, Dr., 8012 Haar, DE; Eith, Gerhard,  
8000 München, DE

⑤6 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit  
in Betracht gezogene Druckschriften:

DE 23 48 169 C3  
DE 20 45 152 C3  
DE 20 45 108 C3  
DE-AS 14 88 698  
DE-AS 12 35 824  
DE-OS 25 30 045  
US 37 31 267  
US 33 02 043

DE-Z.: Feingerätetechnik, 29. Jg., 1980, S. 316-319;  
US-Z.: IBM Technical Disclosure Bulletin, Vol. 16,  
1973, S. 1899;

⑤4 Piezoelektrischer Motor

DE 33 09 239 C 2

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf einen piezoelektrischen Motor, wie er im Oberbegriff des Patentanspruchs 1 angegeben ist.

Seit mindestens einem Jahrzehnt werden elektromotorische Antriebe mit piezoelektrischer Keramik entwickelt. Zum Beispiel sind in den deutschen Patentschriften 20 45 108, 20 45 152 und 23 48 169, dort mit weiteren Druckschriften-Angaben, piezoelektrische Schwingmotore für mechanische Hubbewegungen beschrieben. Solche Motore sind prinzipiell so aufgebaut, daß sie piezokeramische Lamellen besitzen, die elektrisch zu Biegebewegungen angeregt werden. Aus der DE-OS 25 30 045 und der DE-AS 14 88 698 sind andere piezoelektrische Motore bekannt, die einen Rotations-Abtrieb haben, wobei die Abtriebskraft bzw. das Abtriebsmoment mit Hilfe eines Resonanzkörpers erzeugt wird, der auf piezoelektrischem Wege von einem Piezo-Element angetrieben wird. Im Falle der DE-AS 14 88 698 ist der Resonanzkörper ein Stab, der mit zwei voneinander unabhängigen Anregungseinrichtungen elektrisch angetrieben und zu einer Kreisbewegung seines einen Stabendes veranlaßt wird. Diese beiden Antriebseinrichtungen sind je ein auf verschiedenen Flächen des Stabes angebrachter Piezowandler, wobei ein jeder Wandler ein Elektrodenpaar besitzt, an die je eine Wechselspannung angelegt wird. Die Wechselspannungen haben zwar gleiche Frequenz, aber 90° Phasenverschiebung gegeneinander. Der Stab führt zwei im Prinzip voneinander unabhängige Biegebewegungen aus, die sich zu der erwähnten kreisförmigen Auslenkung des wenigstens einen Stabendes überlagern.

Über einen Reibantrieb wird die Bewegung des Stabendes auf einen in Rotation zu versetzenden Körper übertragen, der Teil des Antriebs eines solchen Motors ist.

Die DE-OS 25 30 045 zeigt eine Vielzahl von Ausführungsformen, wobei die Fig. 5 und 21 Schub-Antriebe zeigen, bei denen jeweils ein oder mehrere in Längsrichtung schwingende piezokeramische Körper mit ihrem einen Ende in nur linearer Richtung pulsierende Schubbewegungen außeraxial auf eine Walze an der dieses Ende anliegt, ausüben, die damit in Rotation versetzt wird. Die Fig. 19 zeigt dagegen eine Ausführungsform, bei der Reibantrieb vorliegt, bei dem jeweils phasengerecht schwingende Streifen aus Piezokeramik intermittierende Kraftübertragung auf ein axial gelagertes Rad ausüben. Fig. 3 zeigt eine Ausführung, bei der die Walze bzw. das Rad der Vibrator ist.

Weitere Ausführungsformen piezoelektrischer Motore mit vorzugsweise Rotationsbetrieb sind in 'Feingerätetechnik', 29. Jhg. (1980), Seiten 316—319 und in IBM Technical Disclosure Bulletin, Bd. 16 (1973), Seite 1899 beschrieben.

Abgesehen von Ausführungen mit pulsierendem, geradlinigem, außeraxialem Schubantrieb entsprechend Fig. 21 aus der DE-OS 25 30 045 ist es die Regel, (wenigstens) zwei elektrische Antriebseinrichtungen für einen oder für zwei Resonanzkörper vorzusehen, wie in IBM, TDB, DE-AS 14 88 698 und in der DE-OS 25 30 045 gezeigt. Im einen Falle wird die hierfür notwendige Phasenverschiebung zwischen den Antriebseinrichtungen durch elektrische Phasenverschiebung bei entsprechender Anordnung der mehreren Antriebseinrichtungen, auf verschiedenen Flächen des sich biegenden Stabes, realisiert. Der andere Fall ist durch zwei im vorzugsweisen rechten Winkel zueinander angeordnete Piezokera-

mik-Elemente als wiederum je eine getrennte Antriebseinrichtung gekennzeichnet, die eine jede ebenfalls 90° phasenverschoben elektrisch gespeist werden und durch jeweilige entsprechende Kräfte auf das mit der Antriebswelle verbundene Rad übertragen.

Es ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein solches Prinzip für einen einschlägigen Piezomotor zu finden, der aufgrund seines erfindungsgemäßen neuartigen Aufbaues mit nur einer elektrischen Wechselspannung zu betreiben ist, und zwar ohne daß dazu elektrische Phasenschieber-Elemente, wie Kondensatoren, Induktivitäten usw., notwendig sind. Mit diesem neuen Prinzip sollen sich sowohl Piezomotore mit Rotationsantrieb als auch mit Linearantrieb, z. B. für den Direktvorschub von Papier, realisieren lassen.

Diese Aufgabe wird mit einem Motor mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Zwei Varianten des prinzipiellen Aufbaus des Motors nach Anspruch 1 gehen aus den Ansprüchen 2 und 3 hervor. Weitere Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung werden durch weitere Unteransprüche erfaßt.

Das physikalische Prinzip eines erfindungsgemäßen Motors ist, für den Resonanzkörper nur eine einzige piezoelektrische Antriebseinrichtung vorzusehen und dennoch kontinuierliche Rotationsbewegung des Abtriebs auf einen zu bewegenden Körper zu erreichen. Es sei darauf hingewiesen, daß diese eine einzige piezoelektrische Antriebseinrichtung auch in mehrere Teileinrichtungen aufgeteilt sein kann, die am Resonanzkörper verteilt angeordnet sind. Immer sind jedoch diese Teileinrichtungen elektrisch in Serie oder parallelgeschaltet, und zwar ohne gegenseitige elektrische Phasenverschiebung. Eine solche Antriebseinrichtung kann also aus einem einzigen piezokeramischen Wandlerplättchen auf dem Resonanzkörper bestehen. Es können aber auch zwei solche piezokeramische Plättchen, vorzugsweise einander gegenüberliegend, an dem Resonanzkörper angeordnet sein, die in Serie oder parallelgeschaltet gespeist werden. Solche mehreren Anteile der einzigen Antriebseinrichtung können auch anders verteilt am Resonanzkörper angebracht werden, jedoch wiederum derart in Serie oder parallelgeschaltet, als wären sie ein einziges Element. Die eine einzige Antriebseinrichtung bzw. die zu dieser einen einzigen Antriebseinrichtung gehörenden Teileinrichtungen erzeugt eine mechanische Kraft bzw. eine resultierende mechanische Kraft im Resonanzkörper, wobei diese Kraft bzw. diese resultierende Kraft eine Kraft ist (zu der auch die Kraft einer Scherbewegung gehört), die zeitlich konstante Richtung im Körper hat.

Die von dieser Antriebseinrichtung erzeugte Kraft bzw. resultierende Kraft bewirkt erfindungsgemäß in dem mechanischen Resonanzkörper die Anregung von zwei voneinander im wesentlichen unabhängigen Schwingungsmoden, die im wesentlichen senkrecht zueinanderstehen und in ihrer mechanischen Bewegung eine Phasenverschiebung von wenigstens angenähert 90° gegeneinander aufweisen. Der erfindungsgemäße Piezomotor erzeugt somit aus der von der Antriebseinrichtung erzeugten Kraft in seinem Resonanzkörper die an sich notwendige zweite Phase selbst.

Physikalisch gesehen, erfolgt — und zwar aufgrund der anspruchsgemäßen Bemessung — eine Kraftaufteilung zur Erzeugung der im Ergebnis vorliegenden zwei voneinander unabhängigen Schwingungsmoden. Nach Patentanspruch 2 erfolgt diese Kraftaufteilung über die anspruchsgemäß bemessene mechanische Kopplung der beiden unabhängigen Schwingungsmoden (die ge-

nau genommen um dieses Maß der Kopplung eine geringe Abhängigkeit voneinander haben). Entsprechend dem Patentanspruch 3 ist vorzugsweise durch die Wahl der Anbringung der Antriebseinrichtung am Resonanzkörper eine Zerlegung der Kraft in die Komponenten der Schwingungsmoden erreicht, die für diesen Fall eine möglichst geringe, vorzugsweise gar keine, Kopplung miteinander haben sollen. Die Alternativen der Ansprüche 2 und 3 umfassen weiterhin das Merkmal, daß die den voneinander unabhängigen Schwingungsmoden der zugehörigen Teilresonatoren des Resonanzkörpers auf unterschiedliche, jedoch nahe beieinanderliegende Frequenzen abgestimmt sind, wobei für die Variante nach Anspruch 2 auch die (geringe) Kopplung zwischen den Schwingungsmoden bzw. zwischen diesen Teilresonatoren in den Frequenzabstand eingeht. Die Frequenz der (gemeinsamen) Anregungsspannung der Antriebseinrichtung (bzw. der Anteile dieser einen Antriebseinrichtung) ist erfindungsgemäß auf einen Wert nahe, vorzugsweise jedoch zwischen, den Frequenzen der Teilresonatoren bemessen.

Zwei bevorzugte, derartige voneinander unabhängige Schwingungsmoden sind z. B. ein Longitudinalschwingungsmoden und ein Scher- oder Biegeschwingungsmoden oder auch zwei zueinander senkrechte Scher- oder Biegeschwingungsmoden des einen anzuregenden Resonanzkörpers des Motors. Die Teilresonatoren können auch als ein Grund- und ein Oberwellenschwinger bemessen sein. Dieser Körper ist wiederum so bemessen, daß die Resonanzfrequenz dieser beiden voneinander unabhängigen Schwingungsmoden nahe beieinanderliegen. Der Resonanzkörper kann z. B. ein Stab sein, der zu zwei zueinander senkrechten Biegeschwingungsmoden angeregt wird, wobei dieser Stab einen Querschnitt hat, der zumindest für einen Anteil seiner Länge einen wenigstens etwas, z. B. von einer quadratischen Form, abweichenden rechteckigen Querschnitt hat. Bei diesem etwas rechteckigen Querschnitt hat der stabförmige Resonanzkörper (bezogen auf nur wenige Prozent unterschiedlichen Seitenkanten dieses Rechtecks) zwei solche Biegeschwingungsmoden, die voneinander abweichende, jedoch erfindungsgemäß nur wenig voneinander verschiedene Frequenzen  $f_1$  und  $f_2$  haben. Die Amplitude jedes der Teilresonatoren hat nämlich — bezogen auf die Anregungsamplitude — eine Phase, die mit wachsender Frequenz bei der jeweils zugehörigen Resonanzfrequenz die Werte von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$  durchläuft. Durch Wahl der Differenzfrequenz  $|f_1 - f_2|$  infolge entsprechender Abmessungen der Teilresonatoren kann für die gegenseitige Phase zwischen diesen Teilresonatoren jeder Wert zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  erreicht werden. Für

$$\frac{|f_1 - f_2|}{\sqrt{f_1 \cdot f_2}} = \frac{1}{Q}$$

erreicht die Phasendifferenz die gewünschten  $90^\circ$ . Die Größe  $Q$  ist die mittlere Schwinggüte.

Für das Prinzip des letztgenannten Ausführungsbeispiels kann der Stab auch einen beispielsweise achtkantigen Querschnitt haben, der jedoch für die zu Seitenkanten dieses Querschnitts rechtwinkligen Symmetrierichtungen von einem regelmäßigen Achteck etwas unterschiedlichen, zur einen Achse jedoch noch spiegelsymmetrischen Querschnitt hat. Für die Variante nach Anspruch 3 haben diese Schwingungsmoden im Resonanzkörper vorzugsweise keine bzw. praktisch keine

Kopplung untereinander.

Bei einer Variante nach Anspruch 2 dagegen ist anspruchsgemäß eine, wenn auch nur geringe, gegenseitige Kopplung der anzuregenden Schwingungsmoden vorzusehen. Infolge der hohen Resonanzgüte der Teilresonatoren des piezoelektrischen Motors erfolgt auch eine Schwingungsanregung desjenigen vorgesehenen Schwingungsmoden, der — im Gegensatz zu dem anderen vorgesehenen zugehörigen Schwingungsmoden — von der Antriebseinrichtung nicht unmittelbar mechanisch angetrieben ist. Die Anregung dieses von der Antriebseinrichtung nicht unmittelbar angetriebenen Schwingungsmoden erfolgt über den direkt von der Antriebseinrichtung angetriebenen anderen Schwingungsmoden, nämlich infolge der vorgesehenen, wenn auch geringen, gegenseitigen Kopplung. Damit ergibt sich im übrigen auch eine Verschiedenheit der Frequenz der beiden Teilresonatoren, selbst wenn sie physikalisch für sich betrachtet gleich große Resonanzfrequenz hätten. Die vorzusehende gegenseitige Kopplung liegt etwa im Bereich der Werte der kritischen Kopplung der betreffenden Schwingungsmoden miteinander. Wird der Resonanzkörper mit einer Frequenz angeregt, die in der Mitte zwischen den beiden Frequenzen der beiden Schwingungsmoden liegt, wird die Phasenverschiebung  $90^\circ$  zwischen den Schwingungen der beiden Teilresonatoren wirksam. Bei der Erfindung wird, wie aus dem Voranstehenden hervorgeht, die an sich notwendige Phasenverschiebung physikalisch gesehen auf mechanischem Wege im System des Resonanzkörpers und der Teilresonatoren erzeugt.

Zwei zueinander senkrechte Longitudinalschwingungen des jeweiligen Grundmoden eines Resonanzkörpers haben im allgemeinen eine zu große gegenseitige Kopplung, um für die Erfindung ausreichend nahe benachbarte Resonanzfrequenzen  $f_1$  und  $f_2$  zu haben. Eine gegenseitige Kopplung von Longitudinalschwingungen hat jedoch ein in den Bereich der Erfindung fallendes Maß, wenn die eine oder beide dieser Longitudinalschwingungen der Teilresonatoren Oberwellenschwingungen mit  $f_1$  und  $f_2$  sind, d. h. die Teilresonatoren dementsprechend bemessen sind.

Weitere Erläuterungen der Erfindung gehen aus den Ausführungsbeispielen hervor.

Fig. 1 bis 4 zeigen Ausführungsformen speziell zur ersten Variante und

Fig. 5 bis 7 Ausführungsformen speziell zur zweiten Variante.

In Fig. 1 ist mit 1 der gesamte Motor bezeichnet, der ein anzutreibendes Rad 2 mit der Antriebswelle 3 hat. Mit 4 ist der gesamte Resonanzkörper bezeichnet, an dem ein Streifen oder Plättchen aus Piezokeramik als Wandler 5 angebracht ist. Vorzugsweise ist aus Symmetriegründen ein gleicher Wandler 5' auf der gegenüberliegenden Seite des Resonanzkörpers 4 angebracht. Die Wandler 5 und 5' bilden zusammen eine einzige einheitliche Antriebseinrichtung. Die Wandler haben auf ihren Großflächen Elektrodenbelegungen 6, an die über die Anschlußleitungen 7 und ohne zwischengeschaltete Phasenglieder die nur eine einzige speisende bzw. anregende elektrische Wechselspannung 8 anzulegen ist. Die Frequenz der Wechselspannung 8 und die die Resonanz bestimmenden Abmessungen des Körpers 4 sind erfindungsgemäß aufeinander abgestimmt bemessen. Für den frei schwingenden Resonanzkörper 4 ist eine in der Fig. 1 der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellte Halterung vorgesehen, die im Bereich der Schwingungsknotenfläche 9 des Resonanzkörpers 4 an diesem an-

greift. Bezogen auf diese Knotenfläche 9 befindet sich die Antriebseinrichtung mit den Wandlern 5, 5' an dem auf der einen (in der Figur linken) Seite dieser Fläche 9 vorhandenen Anteil 4' des Resonanzkörpers. Die Lage der Antriebseinrichtung 5 außerhalb des Bereiches maximaler Verzerrung 9 erlaubt es, in diesem Bereich 9 Verzerrungsamplituden von einer Größe zu erzeugen, wie sie im Material der Antriebseinrichtung nicht mehr zulässig sind. Dadurch ist es möglich, sofern die Schwinggüte des Resonators ausreichend hoch ist, durch schwächere Einkopplung der Wandler höhere Resonatoramplituden zu erreichen. Der übrige (auf der anderen Seite dieser Knotenfläche 9 liegende) Anteil 4'' des gesamten Resonanzkörper 4 enthält die Abtriebsfläche 10, mit der der Resonanzkörper 4 an der Umfangsfläche des anzutreibenden Rades 2 in einer für einen derartigen Piezomotor bekannten Weise mehr oder weniger stark berührend anliegt.

Wie insbesondere aus der Fig. 1 ersichtlich, besitzt der Anteil 4'' des Resonanzkörpers 4 einen Einschnitt 11, der von der Abtriebsfläche 10 ausgehend in Richtung auf die Knotenfläche 9 verläuft. In einer gedachten Weise teilt dieser Einschnitt 11 den Anteil 4'' des Resonanzkörpers 4 nochmals in zwei Anteile 14 und 14'. Zum Anteil 14' gehört die Abtriebsfläche 10'.

Für diese voranstehend beschriebene, in Fig. 1 dargestellte Ausführungsform ist die Betriebsweise die folgende: Durch Anlegen der elektrischen Wechselspannung 8 wird mit Hilfe der Wandler 5, 5' der gesamte Resonanzkörper 4 in Resonanzschwingung mit der Schwingungs-Knotenfläche 9 versetzt. Der Anteil 14 des Resonanzkörpers führt dabei (ebenso wie der Anteil 14') eine Longitudinalschwingung aus, auf die mit dem Doppelpfeil 15 hingewiesen ist. Diese Longitudinalschwingung 15 bewirkt, daß sich die Abtriebsfläche 10 der Umfangsfläche des Rades 2 derart periodisch nähert und entfernt, daß während der Phase der Annäherung die Abtriebsfläche 10 mit Anpreßdruck an dieser Umfangsfläche des Rades 2 anliegt.

Infolge der wie aus der Fig. 1 ersichtlichen unsymmetrischen Lage der Abtriebsfläche 10 — bezogen auf den gesamten Resonanzkörper 4 — führt diese Abtriebsfläche 10 außerdem auch noch eine — bezogen auf die Umfangsfläche des Rades 2 — tangentiale Bewegung aus, die durch den Doppelpfeil 16 angedeutet ist. Diese Tangentialbewegung der Abtriebsfläche 10 rührt von einer Biegeschwingung des Anteils 14 des Resonanzkörpers 4 her. Der Vollständigkeit halber sei darauf hingewiesen, daß auch die mit der Abtriebsfläche 10 vergleichbare Endfläche des Anteils 14' des Resonanzkörpers 4 eine entsprechende gegenphasige Auslenkung 16 infolge ebenfalls auftretender Biegeschwingung ausführt.

Der Resonanzkörper 4 führt, wie voranstehend beschrieben, trotz Anregung mit nur einer Wechselspannung an nur einer Antriebseinrichtung 5, 5' sowohl eine Longitudinalschwingung 15 als auch eine Biegeschwingung 16 aus, beide mit der Knotenfläche 9. Der Resonanzkörper 4 ist so bemessen, daß die beiden Schwingungen 15 und 16 bei der einen einzigen Anregungsfrequenz der Wechselspannung 8 Resonanz haben. Für jede der beiden voneinander unabhängigen Schwingungen 15 und 16 hat der Resonanzkörper 4 einen möglichst hohen (mittleren) Wert der mechanischen Güte Q (für die Teilresonatoren).

Die aus der Überlagerung der Schwingungen resultierende Bewegung der Abtriebsfläche ist derart, daß die Abtriebsfläche in der Phase der Annäherung dieser

Fläche 10 an der Umfangsfläche des Rades 2 eine Biege-Auslenkbewegung 16 in stets der einen Richtung ausführt. Die entgegengesetzte tangentiale Bewegung der Abtriebsfläche 10 führt diese während derjenigen Phase aus, während der diejenige Phase der Longitudinalschwingung 15 vorliegt, bei der sich die Abtriebsfläche 10 mehr als der Ruhelage entspricht vom Umfang des Rades 2 entfernt hat.

Durch in an sich bekannter Weise zu treffende Wahl der jeweils frequenzbestimmenden Abmessungen des Resonanzkörpers 4 und der Abmessungen seiner Teilresonatoren, nämlich durch die Längsabmessung des Teilresonators 4 für die Longitudinalschwingung und die Tiefe des Einschnitts 11 im Teilresonator 4'' für die Biegeschwingung, werden die Frequenzwerte  $f_1$  bzw.  $f_2$  dieser Teilresonatoren eingestellt. Der notwendige Wert der gegenseitigen Kopplung  $k$  der Teilresonatoren wird z. B. durch Massenunsymmetrien hergestellt. Dazu können die Ecken 141 und 141' entfernt oder mit entgegengesetzter Wirkung wie in Fig. 2 können Massen 142, 142' im Schlitzbereich 11 weggelassen werden.

Fig. 2 zeigt eine besondere Ausgestaltung eines erfindungsgemäßen piezoelektrischen Motors nach dem Prinzip derselben Variante desjenigen der Fig. 1. Mit der Fig. 1 funktionell übereinstimmende Teile haben in Fig. 2 die gleichen Bezugszeichen. Im Bereich der Schwingungsknotenfläche 9 liegt beim Resonanzkörper nach Fig. 2 jedoch eine Abstufung vor, so daß der sich an diese Fläche 9 in der Fig. 2 nach rechts anschließende Anteil 24 des gesamten Resonanzkörpers verjüngt ist. Dies ergibt eine Amplitudentransformation derart, daß der Anteil 24 des gesamten Resonanzkörpers an seiner der Umfangsfläche des Rades 2 gegenüberliegenden Abtriebsfläche 10 des Resonanzkörpers prinzipiell größere Amplituden als beim Beispiel der Fig. 1 ausführt, und zwar sowohl in tangentialer als auch in radialer Richtung — bezogen auf das Rad 2.

Fig. 3 zeigt eine Ausführungsform zur ersten Variante, jedoch mit zwei, aber zeitlich nur alternativ zu betreibenden Antriebseinrichtungen. Die eine Antriebseinrichtung ist für den einen Drehsinn (Vorwärtslauf), die andere für den entgegengesetzten Drehsinn des Rades 2 zu betreiben. Der Wandler 35 ist die eine, der Wandler 35' ist die andere der Antriebseinrichtungen. Wiederum sind die Wandler 35, 35' für Leistungsoptimierung vorzugsweise außerhalb des Bereichs der Schwingungsknotenfläche 9 angeordnet. Die Elektroden der Wandler 35 und 35' sind — wie dargestellt — mit der Spannungsquelle 8 verbunden, und zwar für den alternativen Betrieb über einen Wechselschalter 37. Durch Verbinden der Spannungsquelle 8 mit der Leitung 37' und dem Wandler 35 kann das Rad 2 im einen Umdrehungssinn angetrieben werden. Bei Verbindung mit der Leitung 37'' und dem Wandler 35' kann (ohne Phasendrehglied) eine um 180° phasenverschobene Anregung des Biegeschwingungsmodes bei unveränderter Phase des Longitudinalschwingungsmodes erreicht werden. Dies führt zu entgegengesetztem Antriebssinn des Rades 2.

Fig. 4 zeigt eine Ausführungsform mit zwei Longitudinalschwingungen des Resonanzkörpers 44, der aus den Anteilen 44' und 44'' besteht. An vorzugsweise dem Anteil 44' ist außen der Wandler 45 mit seinen Anschlüssen für die speisende Wechselspannung 8 angebracht. Die mit dem Doppelpfeil 15' angedeutete Schwingung ist eine Oberwellen-Longitudinalschwingung des Resonanzkörpers 44. Mit dem Doppelpfeil 150 ist auf eine Querschwingung des Resonanzkörpers 44 speziell im Anteil 44'' hingewiesen. Die Oberwellen-Longitudinal-

schwingung 15' und die Querschwingung 150 können auch dann, wenn die Schwingung 150 der Grundschwingungsmoden dieser Querschwingung ist, diese erfindungsgemäß geringe gegenseitige Kopplung haben, so daß der erfindungsgemäß geringe Frequenzunterschied  $|f_1 - f_2|$  bei (zusätzlicher) entsprechender Bemessung der jeweils frequenzbestimmenden Abmessungen des Resonanzkörpers 44 erreicht wird. Insbesondere kann die Resonanzfrequenz  $f_2$  der Querschwingung mit Hilfe einer Einkerbung oder eines Schlitzes im Resonanzkörper herabgesetzt und eingestellt werden. In der Fig. 4 ist ein solcher im wesentlichen Bereich des Teilresonators der Querschwingung 150 angeordneter Schlitz 41 dargestellt. Anstelle eines wie dargestellten Schlitzes 41 kann dies auch ein beidseitiges Sackloch sein. Insbesondere kann dies auch eine wie mit 41' als Alternative gestrichelt dargestellte Einkerbung sein, die — wie dargestellt — von der Stirnseite eingebracht ist.

Im Bereich der Berührung der (in der Fig. 4 nicht sichtbaren rückwärtigen) Seitenfläche des Anteils 44" mit dem Umfang des Rades 2 erfolgt der Abtrieb aus dem Resonanzkörper 44, und zwar ebenso wie bei den vorangehend beschriebenen Ausführungsbeispielen. Auch bei diesem Beispiel führt diese Seitenfläche dort aufgrund der beiden 90° phasenversetzten Schwingungen 15' und 150 die Rotationsbewegung aus, die aus zwei zueinander senkrechten, jedoch 90° phasenverschobenen Bewegungskomponenten (in der Ebene des Rades 2) zusammengesetzt ist.

Fig. 5 zeigt eine Ausführungsform zur zweiten Variante nach Anspruch 3 mit einem Resonanzkörper 54, der einen (wie oben schon erwähnten, wie dargestellten) achteckigen Querschnitt hat. Die bezüglich des Schwingungsverhaltens des einen Biegeschwingungsmoden zusammengehörigen Flächen 52, 52' und die bezüglich des anderen Schwingungsmoden zusammengehörigen Flächen 53, 53' des prismatischen Resonanzkörpers 54 haben vorzugsweise eine etwas geringere Breite als die übrigen Flächen 58. Für das Schwingungsverhalten und insbesondere die Schwingungsfrequenz des einen Schwingungsmoden ist die Abmessung a maßgebend. Mit dem Doppelpfeil A ist die diesem Schwingungsmoden zugehörige Biegeschwingungs-Auslenkung kenntlich gemacht. Entsprechendes gilt für den anderen Schwingungsmoden mit der Abmessung b und der Biegeschwingungs-Auslenkung B. Auf der Fläche 58, deren Flächennormale weder mit der Richtung A noch mit der Richtung B übereinstimmt, vorzugsweise im Winkel zwischen diesen beiden Richtungen liegt, ist ein Piezokeramik-Plättchen 55 als Wandler der einzigen Antriebseinrichtung angebracht. Zur möglichst verlustarmen Schwingungsanregung befindet sich dieses Plättchen 55 nicht im Bereich maximaler Biegespannungen, sondern mehr im Bereich des Stabendes. Gestrichelt, weil lediglich zusätzlich, ist auf die Anbringungsmöglichkeit eines weiteren Wandlers 55' hingewiesen. Sind zwei derartige Plättchen 55, 55' vorgesehen, bilden sie dennoch eine einzige Antriebseinrichtung, denn beide Plättchen 55, 55' werden elektrisch parallel oder in Serie gespeist. Wie üblich für die Erzeugung von Biegeschwingungen eines Stabes kann auch ein zusätzlicher Wandler — wie das Plättchen 55 — gegenüber diesem Plättchen 55 angebracht sein. Die für additiv wirksame Anregung dieses Wandlers 55 und des parallel oder in Serie betriebenen Wandlers auf der Fläche 58' vorzuziehende Phase von 180° wird durch entgegengesetzt gerichtete permanente Polarisation dieser Wandler erzielt. Alle Wandler sind ohne elektrische Phasenverschiebe-Elemente elek-

trisch parallel oder in Serie an die Anschlüsse 8 der speisenden Wechselspannung angeschlossen. Alle Wandler 55, 55' erzeugen zusammengenommen eine einzige, von Null verschiedene resultierende Kraft, die als in Richtung des Doppelpfeils C wirksam anzusehen ist und aus der die Schwingungsanregungen A und B entstehen. Mit 2 ist das an der einen Fläche 53' anliegende angetriebene Rad des Motors nach Fig. 5 bezeichnet. Der Frequenzunterschied der beiden Schwingungsmoden A und B untereinander beruht auf dem für die Erfindung wichtigen Unterschied der Abmessungen a und b entsprechend der Formel

$$\frac{|a-b|}{b} \approx \frac{1}{Q}$$

worin Q die Schwingungsgüte für die beiden Schwingungsmoden A und B ist.

Fig. 6 zeigt eine andere Ausgestaltung einer Ausführungsform der zweiten Variante mit einem Resonanzkörper 64 in Form eines Stabes mit hier sogar quadratischem Querschnitt, jedoch mit — wie aus der Figur ersichtlich — in mindestens einer von zwei gegenüberliegenden Flächen des Stabes vorgesehener Nut 111. Diese eine oder diese beiden Quernuten ergeben an dieser Stelle einen rechteckigen Querschnitt des Stabes des Resonanzkörpers 64 und führen wie beim Ausführungsbeispiel der Fig. 5 durch die unterschiedliche Bemessung der Abmessungen a und b dazu, daß dieser Stab in den mit A und B bezeichneten Schwingungsrichtungen um ein geringes Maß unterschiedliche Eigenresonanzfrequenzen der zugehörigen Stab-Biegeschwingungen hat. Die angebrachten Piezokeramik-Wandler 65, 65' und 165, 165' wirken jeweils paarweise wie der an der Schrägfläche 54 angebrachte Wandler 55 des Ausführungsbeispiels der Fig. 5. Es wird jeweils eine in Querschnitts-Diagonalrichtung wirkende lineare resultierende Kraft C infolge der Anregung mit elektrischer Wechselspannung an den Anschlüssen 8 erzeugt. Die elektrische Verbindung der Wandler 65 bis 165' ist beispielsweise wie dargestellt gewählt, so daß wieder nur eine einzige Antriebseinrichtung, bestehend aus einzelnen Teilen 65 bis 165', vorliegt. Mit 2 ist wieder das anzutreibende Rad bezeichnet. Gestrichelt sind alternative Stellen der Anordnung eines solchen Rades 2 angedeutet. Der Resonanzkörper 64 hat für die beiden Biegeschwingungen A und B symmetrisch zur Mitte wieder zwei Schwingungsknotenflächen 9, in deren Bereich vorzugsweise die Wandler 65 bis 165' angeordnet sind. Die eine oder zwei voranstehend erwähnten Quernuten sind vorzugsweise in der Mitte der Stablänge im Bereich größter mechanischer Spannung im schwingenden Zustand angeordnet.

Fig. 7 zeigt eine weitere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen piezoelektrischen Motors. Dieser Motor ist als für einen linearen Direktantrieb z. B. eines Blattes Papier 100 angeordnet dargestellt. Mit der unteren stirnseitigen Querschnittsfläche berührt der stabförmige Resonanzkörper 74 die Oberfläche dieses Blattes Papier 100. Im Bereich der einen bzw. im Bereich der beiden Schwingungsknotenflächen des frei schwingenden Körpers 74 sind Halterungen für diesen Resonanzkörper vorgesehen, deren Darstellung jedoch lediglich schematisch ist. Es sei auch darauf hingewiesen, daß der besseren Übersichtlichkeit halber die Längenabmessung b des Resonanzkörpers 74 stark vergrößert ist, bezogen auf die Kantenabmessungen a.

Obwohl der piezoelektrische Motor nach Fig. 7 der bildlichen Darstellung nach demjenigen der Fig. 6 zu gleichen scheint, ist dieser Motor der ersten Variante (Patentanspruch 2) der Erfindung zuzurechnen. Mit Hilfe des Wandler 75 können in dem Resonanzkörper 74 bei der Bemessung  $2 \cdot a = b$  (d. h. doppelte Höhe des Parallelepipedes) die Longitudinalschwingung in Richtung der Abmessung  $b$  und die Biegeschwingung mit den Schwingungsamplituden entsprechend dem Doppelpfeil A erzeugt werden. Diese Longitudinalschwingung entspricht dem einen Teilresonator und diese Biegeschwingung entspricht dem anderen Teilresonator des Resonanzkörpers 74. Die untere Stirnfläche des Resonanzkörpers 74 führt dann wieder eine entsprechende aus zwei  $90^\circ$  phasenverschobene Komponenten zusammengesetzte Rotationsbewegung mit entsprechend periodischer Annäherung dieser Stirnfläche an die Papieroberfläche 100 aus. Diese Umlaufbewegung führt entsprechend dem Drehsinn dieses Umlaufs zu einem kontinuierlichen linearen Transportantrieb des Papiers 100, der mit dem Pfeil 105 angedeutet ist. Der Drehsinn hängt davon ab, welche erfindungsgemäß in dem Resonanzkörper 74 erzeugte Phasenverschiebung zwischen den Schwingungen der beiden angegebenen Teilresonatoren (für die Longitudinalschwingung und für die Biegeschwingung) sich ergibt.

Mit 75' ist ein weiterer Wandler dargestellt, der elektrisch dem Wandler 75 parallel oder in Serie gespeist das voranstehend beschriebene Schwingungsverhalten des Resonanzkörpers 74 unterstützt.

Die voranstehende Beschreibung gilt sinngemäß für den Wandler 175, der auf der im  $90^\circ$  Winkel vorhandenen benachbarten Seitenfläche des Resonanzkörpers 74 angebracht ist. Ein Wandler 175' hat eine dem Wandler 75' entsprechende Wirkung und Bedeutung. Wird nur der Wandler 175 (d. h. nicht auch der Wandler 75) mit der elektrischen Wechselspannung gespeist, so ergeben sich im Resonanzkörper 74 wieder zwei Teilresonatoren mit einer Longitudinalschwingung in Richtung der Abmessung  $b$  und einer Biegeschwingung, hier aber mit einer Schwingungsamplitude entsprechend dem Doppelpfeil B. Anregung des Resonanzkörpers 74 mit Hilfe des Wandler 175 (und/oder 175') führt entsprechend der im Innern des Resonanzkörpers 74 erfindungsgemäß erzeugten  $90^\circ$  Phasenverschiebung dieser verschiedenen Schwingungsmoden zu einem Transportantrieb entsprechend dem Pfeil 106. Besonders günstige Bedingungen für die dargestellten Halterungen 101 ergeben sich, wenn eine Longitudinal-Oberschwingung, die sogenannte  $2\lambda$  Schwingung, verwendet wird, wie sie sich bei der Bemessung  $b \approx 4a$  ergibt. Longitudinale Bewegungsknoten und Biegeknoten fallen dann zusammen.

Wird also der Resonanzkörper 74 entweder mit Hilfe des Wandler 75 oder alternativ mit Hilfe des Wandler 175 angeregt, ergibt sich die Transportbewegung 105 oder alternativ die Transportbewegung 106. Im Sinne der Erfindung wären die Wandler 75 (gegebenenfalls zusammen mit 75') und der Wandler 175 (gegebenenfalls zusammen mit dem Wandler 175') zwei (im Sinne der Erfindung) verschiedene, alternativ zu betreibende unabhängige Antriebseinrichtungen, wie sie schon zur Fig. 3 beschrieben worden sind.

Man kann jedoch die Wandler 75 (gegebenenfalls mit 75') und 175 (gegebenenfalls mit 175') auch gleichzeitig zusammengefaßt betreiben, d. h. mit ein und derselben Wechselspannung elektrisch parallel oder in Serie speisen. Da im Gegensatz z. B. zur Fig. 3 hier jeweils ein

Longitudinalschwingungsmoden und ein Biegeschwingungsmoden zusammenwirken, die jeweils allein vom Wandler 75 (gegebenenfalls mit 75') und vom Wandler 175 (gegebenenfalls mit 175') angeregt werden, erfolgt bei gleichzeitiger Anregung der Wandler 75 (ggf. mit 75') und 175 (ggf. mit 175') eine aus den Richtungen 105 und 106 resultierende, im Winkel zu diesen beiden Richtungen ausgerichtete Bewegung, z. B. in der Richtung 107. Die beiden Wandler 75 (ggf. mit 75') und 175 (ggf. mit 175') sind dann im Sinne der Erfindung eine einzige Antriebseinrichtung, die Wandler 75 und 175 sind Anteile derselben. Je nach gegeneinander unterschiedlicher Stärke der Anregung dieser Anteile ist die Bewegungsrichtung 107 näher der Richtung 105 oder näher der Richtung 106.

Durch zusätzliche Anbringung von Wandlern auf den beiden in der Fig. 7 nicht sichtbaren Rückseiten, d. h. jeweils gegenüberliegend den Wandlern 75 und 175 (und gegebenenfalls 75' und 175'), und durch alternative Anregung des einen oder des anderen oder der beiden dem Wandler 75 und/oder dem Wandler 175 gegenüberliegenden (in der Fig. 7 nicht sichtbaren) Wandler, lassen sich auch Bewegungsrichtungen in allen Richtungen aller übrigen Quadranten, d. h. in jeder Richtung der Ebene der Papierebene 100, erreichen.

Für eine Richtung 107 sind, wie gesagt, Wandler 75 und 175 gemeinsam elektrisch parallelgeschaltet zu betreiben. Sie werden mit einer Wechselspannung gleicher Frequenz für beide Wandler gespeist. Bei wie angegebenen quadratischem Querschnitt  $a \cdot a$  hat der zum Wandler 75 gehörige Teilresonator A der Biegeschwingung gleiche Frequenz wie der zum Wandler 175 gehörige Teilresonator der Biegeschwingung B. Bei nur nahezu quadratischem, d. h. etwas rechteckigem Querschnitt, oder bei Anbringung einer (wie schon zur Fig. 6 beschriebenen) Quernut oder Kerbe 711 ergeben sich für die Teilresonatoren der Biegeschwingungsmoden A und B unterschiedliche Resonanzfrequenzen. Bei einer solchen speziellen Ausführungsform der Fig. 7 kann dann durch Frequenzänderung der Frequenz der speisenden Wechselspannung, und zwar im Bereich der nahe beieinanderliegenden Resonanzfrequenzen der Biegeschwingungen A und B, jeweils die eine oder die andere Biegeschwingung stärker angeregt werden, und zwar bei gleichzeitiger Schwingungsanregung des Longitudinalmoden des Longitudinal-Teilresonators. Eine solche Frequenzänderung der speisenden Wechselspannung führt dann ebenfalls zu einer Änderung der Transportbewegungsrichtung 107 im Winkelbereich zwischen den beiden Richtungen 105 und 106.

In den meisten Figuren sind die Wandler, die vorzugsweise aus Piezokeramik bestehen, mit rechteckiger Form wiedergegeben. Vorzugsweise werden jedoch runde Scheiben oder Plättchen für diese Wandler verwendet.

#### Patentansprüche

1. Piezoelektrischer Motor mit wenigstens einem zu elastischen Schwingungen vorgegebener Betriebsfrequenz anzuregenden Resonanzkörper mit wenigstens einer Abtriebsfläche, die im Betrieb eine Abtriebsbewegung ausführt, die aus zwei Bewegungskomponenten besteht, die miteinander einen wesentlichen Winkel bilden und gegeneinander eine wesentliche Phasenverschiebung haben, wobei der Resonanzkörper eine Antriebseinrichtung für piezoelektrischen Antrieb hat, die Elektroden hat,

denen eine anregende Wechselspannung mit der Betriebsfrequenz zuzuführen ist, und wobei der Resonanzkörper so bemessen ist, daß er für diese Betriebsfrequenz für jede der beiden Bewegungskomponenten einen Teilresonator enthält, gekennzeichnet dadurch, daß nur eine mit nur einer Wechselspannung (8) zu speisende Antriebseinrichtung (5, 35, 45, 55, 65, 75) für solche zwei Teilresonatoren vorgesehen ist, daß im Resonanzkörper (4, 24, 44, 54, 64, 74) eine mechanisch wirksame Aufteilung für die einzige resultierende Antriebskraft der nur einen Antriebseinrichtung auf zwei Teilresonatoren vorhanden ist, daß die Teilresonatoren Resonanzfrequenzen  $f_1$  und  $f_2$  haben, die sich nicht mehr und nicht weniger als

$$\frac{1}{3} Q < \frac{|f_1 - f_2|}{\sqrt{f_1 \cdot f_2}} < 3 \cdot Q$$

voneinander unterscheiden, worin  $Q$  der mittlere mechanische Betriebs-Gütwert der Teilresonatoren ist, und daß die eine der beiden Resonanzfrequenzen ( $f_1, f_2$ ) größer oder angenähert gleich der Betriebsfrequenz und die andere der beiden Resonanzfrequenzen ( $f_2, f_1$ ) kleiner oder angenähert gleich der Betriebsfrequenz ist.  
 2. Piezoelektrischer Motor nach Anspruch 1, weiterhin gekennzeichnet dadurch, daß diese Teilresonatoren miteinander gekoppelt sind und daß das Maß der gegenseitigen Kopplung  $k$  wenigstens angenähert dem Reziprokwert des Mittelwertes der mechanischen Betriebsgüte  $Q$  der Teilresonatoren beträgt und daß die Resonanzfrequenzen  $f_1$  und  $f_2$  derart zueinander gewählt sind, daß die Differenz ( $f_1 - f_2$ ) nicht wesentlich größer ist als aufgrund der Kopplung  $k$  vorgegeben ist (Fig. 1—4 und 7).  
 3. Piezoelektrischer Motor nach Anspruch 1, weiterhin gekennzeichnet dadurch, daß zwischen den Teilresonatoren (A, B) nur eine höchstens verschwindend kleine Kopplung  $k$  vorliegt, daß die nur eine Antriebseinrichtung am Resonanzkörper so angeordnet ist, daß die anregende Kraft dieser Antriebseinrichtung in jeweilige Komponenten aufgeteilt wenigstens angenähert gleichermaßen auf die zwei Teilresonatoren wirkt (Fig. 5 und 6).

4. Piezoelektrischer Motor nach einem der Ansprüche 1 bis 3, gekennzeichnet dadurch, daß die Antriebseinrichtung mehrere elektrisch parallel oder in Serie geschaltete Wandler (55, 55'; 65, 65'; 75, 175) umfaßt.

5. Piezoelektrischer Motor nach einem der Ansprüche 1 bis 4, gekennzeichnet dadurch, daß der Resonanzkörper (44) so bemessen ist, daß bei der vorgegebenen Betriebsfrequenz der eine Teilresonator auf einer Oberwellen-Resonanz schwingt (Fig. 4).

6. Piezoelektrischer Motor nach einem der Ansprüche 1 bis 5, gekennzeichnet dadurch, daß der wenigstens eine Wandler an dem Resonanzkörper an einem Ort angeordnet ist, der außerhalb einer Zone maximaler Verzerrung des Resonanzkörpers im Betrieb liegt.

7. Piezoelektrischer Motor nach einem der Ansprü-

che 1 bis 6, gekennzeichnet dadurch, daß der Resonanzkörper (24) als Amplitudentransformator ausgebildet ist (Fig. 2).

8. Piezoelektrischer Motor nach einem der Ansprüche 1 bis 7, für umschaltbare Betriebsbewegung in einer Richtung und in Gegenrichtung gekennzeichnet dadurch, daß die Antriebseinrichtung (35, 35') doppelt vorhanden ist, wobei diese Antriebseinrichtungen alternativ zu betreiben sind und wobei diese beiden Antriebseinrichtungen auf gegenüberliegenden Flächen des Resonanzkörpers (4) angeordnet sind (Fig. 3).

9. Piezoelektrischer Motor nach einem der Ansprüche 1 bis 8 für wahlweise zu bestimmende Bewegung des Abtriebs, wobei sich diese Bewegung aus zwei zueinander senkrechten Komponenten zusammensetzt, gekennzeichnet dadurch, daß die Antriebseinrichtung (75, 175) wenigstens zweifach vorhanden ist und jeweils zwei dieser Antriebseinrichtungen sich auf zwei zueinander im wesentlichen senkrechten Flächen des Resonanzkörpers befinden (Fig. 7).

10. Piezoelektrischer Motor nach einem der Ansprüche 1 bis 9, gekennzeichnet dadurch, daß die wenigstens zwei Teilresonatoren des Resonanzkörpers auf Biegeschwingungsmoden abgestimmt bemessen sind (Fig. 5, 6).

11. Piezoelektrischer Motor nach einem der Ansprüche 1 bis 9, gekennzeichnet dadurch, daß ein Teilresonator des Resonanzkörpers auf Biegeschwingung abgestimmt bemessen ist und ein zugehöriger zweiter Teilresonator des Resonanzkörpers auf Longitudinalschwingung abgestimmt bemessen ist.

12. Piezoelektrischer Motor nach Anspruch 10, gekennzeichnet dadurch, daß der Resonanzkörper (54) prismatische Form mit voneinander etwas abweichenden Abmessungen (a, b) seines Querschnitts hat (Fig. 5).

13. Piezoelektrischer Motor nach Anspruch 10, gekennzeichnet dadurch, daß der Resonanzkörper prismatische Form mit quadratischem Querschnitt hat und daß der prismatische Körper eine Quernut (111) aufweist (Fig. 6).

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

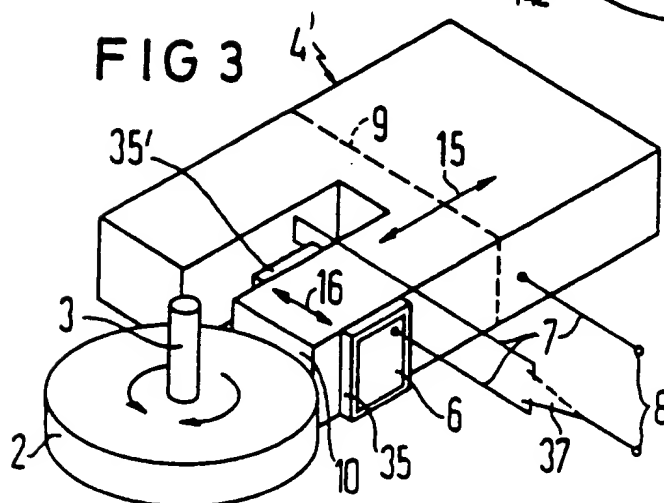
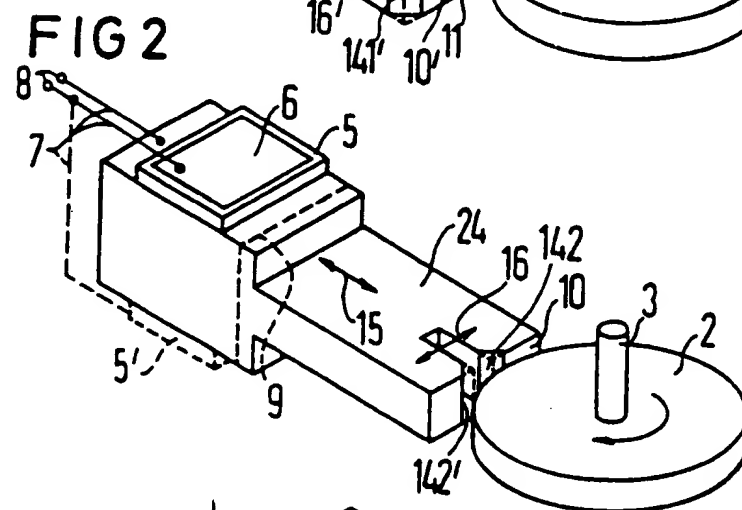
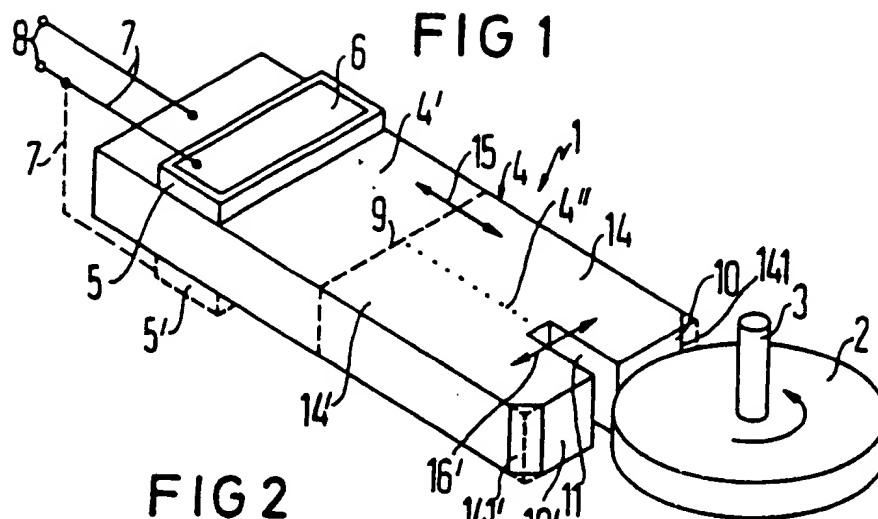






FIG 7

